

# ***Desenvolvimento de um sistema de controle de movimento baseado em atuadores de ligas flexíveis com memória***

FÁBIO BAIRROS<sup>1</sup>

ANDRÉ LUIS BIANCHI<sup>2</sup>

VALNER JOÃO BRUSAMARELLO<sup>3</sup>

JOÃO CARLOS VERNETTI DOS SANTOS<sup>4</sup>

## **RESUMO**

*O presente projeto apresenta o desenvolvimento de um sistema de controle de movimento para atuadores baseados em arranjos de elementos de liga de memória de forma (SMA) eletricamente aquecidos. Esses atuadores, quando aquecidos eletricamente, produzem um movimento mecânico. Neste trabalho é construído e testado um sistema microprocessado que incorpora uma estratégia de aquecimento rápido da liga através de um PWM, para fazer o controle de movimento e velocidade de resposta deste dispositivo.*

**Palavras-chave:** *Atuadores de liga de memória, sistema de controle, controle elétrico de movimento.*

## **ABSTRACT**

*This work presents the development of a system aimed to an actuator based on an electrically heated Shape Memory Alloy (SMA). After being deformed from its original crystallographic configuration, the SMAs have a*

---

<sup>1</sup> Acadêmico de Engenharia Elétrica/ULBRA, bolsista PROICT/ULBRA

<sup>2</sup> Professor da Escola São Lucas/ULBRA

<sup>3</sup> Professor do Curso de Engenharia Elétrica/ULBRA

<sup>4</sup> Professor/Orientador do Curso de Engenharia Elétrica/ULBRA e do PPG em Engenharia: Engenharia, Ambiente e Materiais/ULBRA ([jcverney@ulbra.br](mailto:jcverney@ulbra.br))

*temperature-dependent property, which allow regaining its original geometry. Thus, under heating, the SMA specimen produces a mechanical movement. In this paper, a microcontroller is employed to develop a PWM for controlling the SMA's temperature and so, controlling the displacement and velocity of the device.*

**Keywords:** Shape memory alloys bared actuators, motion control system, control system.

## INTRODUÇÃO

Ligas especiais são usadas como atuadores de estado sólido que se movem por reestruturação molecular, conhecidos como atuadores de memória de forma (SMA). Trata-se de um fio de pequeno diâmetro que contrai como músculos quando é alimentado com corrente elétrica, por isto o elemento também é conhecido vulgarmente por músculo eletrônico. Esta habilidade de flexionar é característica de ligas que mudam suas estruturas internas dinamicamente sob determinadas temperaturas. Este atuador pode aquecer e esfriar rapidamente.

Ligas de Memória de forma (cuja sigla em inglês é SMA, de Shape Memory Alloy) têm uma variedade de usos tanto em robótica como em aplicações não robóticas. Aplicações incluem atuadores em endoscópios ativos (IKUTA et al., 1988), atuadores de robóticos (HIROSE et al., 1985; REYNAERTS e VAN BRUSSEL, 1998; MOSLEY e MAVROIDIS, 2001) e micro-atuadores (TROIS FONTAINE et al., 1998; YAO et al., 2004). Estes atuadores apresentam inúmeras vantagens entre as quais se cita a sua simplicidade mecânica, a alta relação de potência/peso, tamanho reduzido, operação silenciosa e livre de faíscas. Entre as suas desvantagens estão a baixa eficiência, histerese e são considerados de resposta lenta.

Em aplicações de robótica, fatores como velocidade, precisão, controlabilidade e a habilidade para ter movimento contínuo são muito importan-

tes. Por isto, atuadores baseados em dispositivos de SMA são arranjados tipicamente como pares antagonísticos. Eles são aquecidos por efeito joule, ou seja, passando uma corrente elétrica pelo elemento, e são resfriados por meio de transferência de calor para o ambiente. Portanto, são os regimes de aquecimento e resfriamento que determinam a velocidade de resposta de atuadores de SMA. Várias pesquisas têm sido conduzidas para investigar atuadores baseados em ligas SMA em aplicações de controle de movimento rápido e preciso (WELLMAN et al., 1988; GRANT, 1999; REDINIOTIS et al., 2002; ELAHINIA et al., 2004).

O aumento da velocidade de atuadores pode ser obtido aumentando a taxa de resfriamento, através de resfriamento forçado com ar ou água, ou ainda, usando elementos de SMA mais delgados. Por outro lado, para aumentar a taxa de aquecimento, o único método é fazer circular uma corrente maior através do elemento. Porém, o elemento de SMA corre o risco de aquecer demais, sendo então danificado, se uma corrente maior que um certo valor seguro for aplicada durante um período de tempo de longa duração. Este valor seguro pode ser encontrado freqüentemente nos catálogos com características técnicas destes elementos.

Para melhorar a velocidade de resposta, Kuribayashi (1991) propôs o monitoramento da temperatura do SMA, usando esta informação para determinar o nível de corrente através do atuador. Ele mediu diretamente a temperatura do elemento de SMA usando um termopar de

tamanho miniatura. Se a temperatura ultrapassar um limite prefixado, a corrente de aquecimento é reduzida. Caso contrário, uma corrente grande de aquecimento é aplicada. O resultado de incorporar este mecanismo de avaliação de temperatura proporciona uma grande melhoria nos tempos de resposta do atuador.

Alternativamente, a resistência de elementos de SMA varia durante a transformação de fase, e estas informações podem ser usadas para substituir o mecanismo de avaliação de temperatura proposto por Kuribayashi (1991). A vantagem desta estratégia é que elimina a necessidade de instalação especial de sensor de temperatura miniatura para determinar o estado do SMA. Featherstone e Teh (2004)

usam a avaliação da medida de resistência incorporada como mecanismo de limitação de corrente em um sistema de controle de movimento.

Neste trabalho é feita uma avaliação do desempenho de um elemento SMA através da aplicação de uma corrente, e indiretamente da temperatura, controlada por um microcontrolador.

## MATERIAL E MÉTODOS

A Tabela 1 mostra as características técnicas de ligas SMA comerciais. Neste trabalho, utilizou-se um fio de 0,015 mm de diâmetro (0,006 polegadas).

**Tabela 1** - Características técnicas de ligas SMA de diferentes diâmetros.

Diâmetro (polegadas)	Resistência (Ohms/polegada)	Massa máxima de elevação (gramas)	Corrente elétrica aproximada* à temperatura ambiente (mA)	Tempo de contração* (segundos)	Tempo aproximado de resfriamento a partir de 70° C ** (segundos)	Tempo aproximado de resfriamento a partir de 90° C ** (segundos)
0.0010	45.0	7	20	1	0.10	0.06
0.0015	21.0	17	30	1	0.25	0.09
0.002	12.0	35	50	1	0.3	0.1
0.003	5.0	80	100	1	0.5	0.2
0.004	3.0	150	180	1	0.8	0.4
0.005	1.8	230	250	1	1.6	0.9
0.006	1.3	330	400	1	2.0	1.2
0.008	0.8	590	610	1	3.5	2.2
0.010	0.5	930	1000	1	5.5	3.5
0.012	0.33	1250	1750	1	8.0	6.0
0.015	0.2	2000	2750	1	13.0	10.0
0.020	0.16	3562	4000	1	17.0	14.0

\* O tempo da contração é relacionado diretamente à entrada atual. Os valores usados aqui são somente aproximados, já que a temperatura ambiente, correntes de ar, e o calor originado de dispositivos específicos variam. Para pequenos diâmetros ( $\leq 0,006''$ ), as correntes que aquecem o fio em 1 segundo podem tipicamente ser deixadas sobre sem superaquecê-lo. Estes valores podem ser substancialmente mudados através de aquecimento e refrigeração.

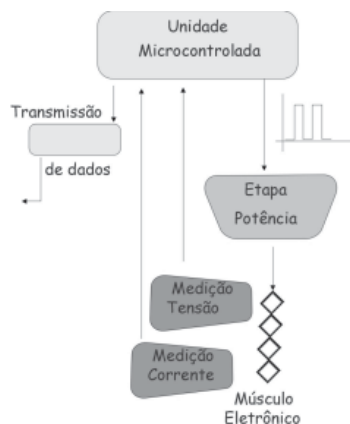
\*\*Tempo aproximado de resfriamento.

Para a realização dos testes na liga metálica foi implementado um circuito de atuação que consis-

te basicamente em um dispositivo microcontrolador, que comanda o movimento da

liga (Figura 1). Esse comando é realizado por um modulador de largura de pulso, o qual possui a

função de controlar a corrente média que circula pelo SMA de acordo com a contração desejada.



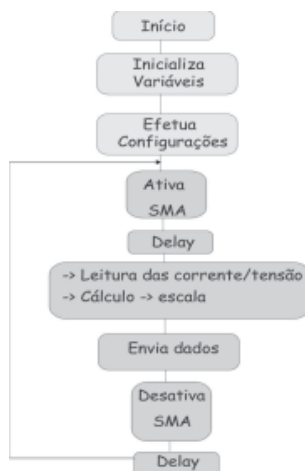
**Figura 1** – Diagrama de blocos simplificado do hardware desenvolvido.

Para implementar o controle, foi empregado o microcontrolador PIC167872. As medições da corrente e tensão são executadas com o auxílio de dois multímetros. E com estes dados pode-se, através de cálculo, obter a resistência e potência elétrica.

O software de controle foi desenvolvido em linguagem C e o procedimento utilizado no software

basicamente consiste em manter um sinal pulsante – PWM para o acionamento do SMA mantendo controlada a corrente e a tensão, evitando, desta forma, que a liga seja danificada através do rompimento do fio e/ou a perda da característica de flexibilidade.

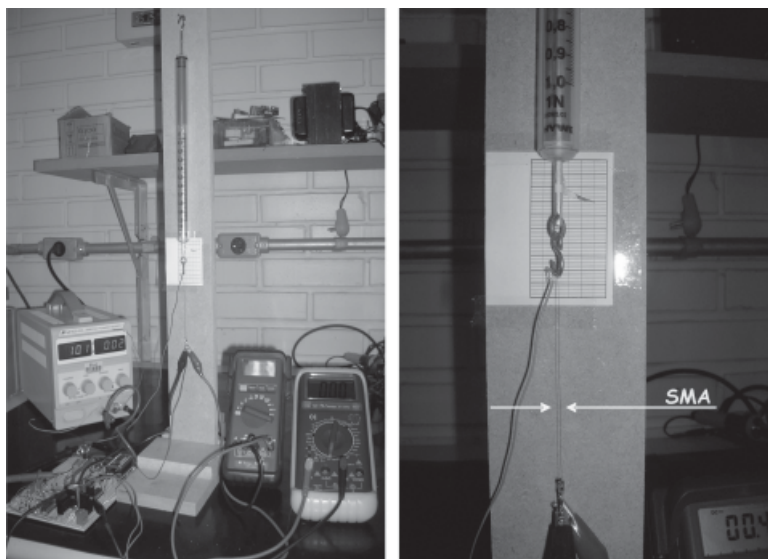
A Figura 2 mostra o fluxograma simplificado utilizado na implementação.



**Figura 2** – Fluxograma simplificado do software implementado.

A liga foi acomodada em uma estrutura de madeira, de modo a permanecer tensionada, sendo sustentada por um dinamômetro que foi utilizado para medir a força exercida quando a liga fosse percorrida por corrente elétrica.

Para determinar o deslocamento ou a contração sofrida pelo material, uma escala milimétrica foi anexada ao suporte. A Figura 3 mostra o protótipo montado para a realização dos testes.



**Figura 3** – Protótipo desenvolvido para a realização dos testes.

## RESULTADOS

Os testes mostraram que com a aplicação de uma excitação do tipo pulso quadrado, a liga SMA começa a responder mecanicamente após 0,5 s, esta resposta é verificada com a contração da mesma. Sem sofrer influência da corrente elétrica, observa-se que o elemento retorna ao ponto de partida, sem que se verifiquem alterações no comprimento.

Como procedimento de teste, foi aplicada uma corrente inferior a recomendada pelo fabricante que era de 400mA para ligas de 0,006 mm<sup>2</sup>, no tempo de 2 segundos, para que o material entre em regime permanente de aquecimen-

to, contraindo-se. O valor estabelecido para cada pulso foi em torno de 380mA.

Com isto observou-se que a liga manteve sempre o mesmo movimento de contração com a corrente, e após 4s de inatividade a liga voltou ao tamanho normal, não se observando alterações no comprimento inicial da liga. No período em que ela estava sob ação da corrente elétrica a contração verificada foi de 1,5mm, constante. Este procedimento foi realizado 30 vezes.

Os dados obtidos nos testes estão apresentados de forma resumida, apenas 15 ensaios, pois não se observou alteração nos demais, na Tabela 2.

**Tabela 2** – Ensaios com a liga SMA.

U (V)	I (mA)	R (W)	P (W)	Deslocamento (mm)	Força (mN)
2,38	380	6,26	0,90	1,5	30
2,48	370	6,70	0,92	1,5	30
2,44	380	6,42	0,93	1,5	30
2,45	380	6,45	0,93	1,5	30
2,42	370	6,54	0,90	1,5	30
2,42	370	6,54	0,90	1,5	30
2,40	380	6,32	0,91	1,5	30
2,48	380	6,53	0,94	1,5	30
2,46	380	6,47	0,93	1,5	30
2,42	380	6,37	0,92	1,5	30
2,38	370	6,43	0,88	1,5	30
2,44	370	6,59	0,90	1,5	30
2,47	380	6,50	0,94	1,5	30
2,43	370	6,57	0,90	1,5	30
2,46	360	6,83	0,89	1,5	30

## CONCLUSÃO

Neste trabalho, foram avaliados amostras, tipo fio, de ligas SMA como atuadores. Foi desenvolvido um sistema baseado em um microcontrolador, o qual teve a função de fazer o controle da temperatura nas amostras. Este sistema de controle de temperatura foi implementado, injetando corrente elétrica, com um PWM, o qual, através de efeito joule do próprio fio provocava um movimento mecânico. Dessa forma, foi possível desenvolver um algoritmo para o controle do deslocamento e velocidade do dispositivo.

Na avaliação das ligas SMA através da aplicação de uma corrente controlada por um microcontrolador, o elemento correspondeu ao resultado esperado sem que fosse verificado dano ou alteração na estrutura física da liga. Dessa forma, este estudo mostrou que é possível utili-

zar o elemento SMA sem a necessidade de um sensor de temperatura. Os resultados observados também mostraram que é possível fazer o controle destes dispositivos, utilizando a estratégia adotada, no entanto, é preciso aprimorar o trabalho visando aumentar a velocidade de resposta.

As ligas SMA ainda não são aplicadas na indústria, mas já é uma realidade nos estudos da medicina e robótica, e em trabalhos futuros, espera-se desenvolver uma aplicação nesse sentido.

## REFERÊNCIAS

ELAHINIA, M. H. et al. Nonlinear stress-based control of a rotary SMA-actuated manipulator. **Journal of Intelligent Materials Systems & Structures**, v.15, n.6, p. 495-508, 2004.

FEATHERSTONE, R.; TEH, Y. H. Improving the speed of shape memory alloy actuators by faster electrical heating . In: International Symposium Experimental on Robotics, 9., 2004, Singapore. **Proceedings...** Singapore, 2004. Paper ID 128.

GRANT, D. **Accurate and rapid control of shape memory alloy actuators**. 1999. Thesis (PhD) - Centre for Intelligent Machines, McGill University ,1999.

HIROSE, S.; IKUTA, K.; UMETANI, Y. A new design method of servo-actuators based on the shape memory efect. In: MORECKI, A.; BIANCHI, G.; KEDZIOR, K. (Eds.). **Theory and practice of robots and manipulators**. Cambridge: MIT Press, 1985. p 339-349.

IKUTA, K.; TSUKAMOTO, M.; HIROSE, S. Shape memory alloy servo actuator system with electric resistance feedback and application for active endoscope In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTS AND AUTOMATION, 1988, Philadelphia. **Proceedings...** Philadelphia: IEEE,1988. p 427-430.

KURIBAYASHI, K. Improvement of the response of an SMA actuator using a temperature sensor. **The International Journal of Robotics Research**, v.10, n.1, p 13-20, 1991.

MOSLEY, M. J.; MAVROIDIS, C. Experimental nonlinear dynamics of a shape memory alloy wire bundle actuator **Transactions ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement & Control**, v.123, n.1, p 103-112, 2001.

REDINIOTIS, O. K. et al. Development of a shape-memory-alloy actuated biomimetic hydrofoil. **Journal of Intelligent Material Systems & Structures**, v.13. p 35-49, 2002.

REYNAERTS, D.; VAN BRUSSEL, H. Design aspects of shape memory actuators. **Mechatronics**, v.8, p 635-656, 1998.

TROISFONTAINE, N.; BIDAUD, P.; DARIO, P. Control experiments on two SMA based micro – actuators. In: CASALS, A.; ALMEIDA, A. T. (Eds.). **Experimental Robotics V**. London: Springer, 1998. p 490-499.

WELLMAN, P. S. et al. Mechanical design and control of a high-bandwidth shape memory alloy tactile display. In: CASALS, A.; ALMEIDA, A. T. (Eds.). London: Springer, 1998. p 56-66.

YAO, Q.; JIN S.; MA, P. The micro trolley based on SMA and its control system. **Journal of Intelligent and Robotic Systems**, v.39, p 199-208, 2004.